

PENGARUH POST-WELD HEAT TREATMENT T6 PADA LAJU PERAMBATAN RETAK FATIK PADUAN AL 6013

Effects of Post-Weld Heat Treatment T6 on the Fatigue Crack Growth Rate of AL 6013

Widia Lastana Istanto¹ dan Jamasri²

Program Studi Teknik Mesin
Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada

ABSTRACT

The effects of post-weld heat treatment T6 on the fatigue crack growth rate of aluminum alloy Al 6013 have been investigated. The investigation was performed under three material conditions : base metal, weld metal without heat treatment, and weld metal with heat treatment. Welding process used filler Al 5356 consisting of longitudinal butt joint and transversal butt joint. In addition, the post-weld heat treatment T6 involved solution treatment, quenching, and artificial aging.

The test of fatigue crack growth rate was performed on two types of specimen: single edge crack specimen for longitudinal butt weld joint and center crack tension specimen for transversal butt weld joint. The test was performed on those specimens with a constant load amplitude at stress level of 20% and stress ratio of 0.3. The load frequency was adjusted from 5 to 15 Hz. The results were treated using seven incremental polynomial method according to the ASTM E-647 to obtain the fatigue crack growth rate curve (da/dN vs ΔK) and Paris equation.

The results show that welding process can increase the fatigue crack growth rate of Al 6013, signed by the increase of n value from 3.25 to 3.93 for longitudinal butt joint, and from 3.09 to 3.70 for transversal butt joint. The post-weld heat treatment also increase the fatigue crack growth rate of Al 6013. The results also show that the strength, elongation, and hardness of Al 6013 decrease after the welding process and the post-weld heat treatment, and there is a change in micro structures that influence the fatigue crack growth rate of Al 6013.

Keywords : Al 6013, post-weld heat treatment, longitudinal butt joint, transversal butt joint, artificial aging.

¹ Kepuh GK III/938 Yogyakarta

² Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

PENGANTAR

Aluminium dan paduannya merupakan bahan logam *non-ferro* yang paling banyak digunakan dalam berbagai bidang, terutama di bidang rancang bangun dan rekayasa. Untuk memenuhi tuntutan perancangan, khususnya di bidang konstruksi, bahan ini seringkali memerlukan penyambungan, terutama dengan metode pengelasan. Teknik penyambungan dengan pengelasan banyak digunakan karena biayanya relatif murah, lebih ringan dan memberikan fleksibilitas dalam perancangan (Cary, 1989). Akan tetapi, sambungan las mungkin menimbulkan lonjakan tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan sambungan mur-baut dan paku keling (Jamasri, 1997). Hal ini disebabkan oleh perubahan struktur mikro pada daerah sekitar las, khususnya pada daerah yang terpengaruh oleh panas (HAZ) yang mengakibatkan turunnya kekuatan bahan, timbulnya tegangan sisa, dan retak mikro.

Apabila suatu bahan diberikan beban berulang (dinamis), maka tegangan sisa dan retak akibat proses pengelasan akan mempengaruhi kekuatan fatik bahan itu. Retak akan merambat hingga mencapai panjang retak kritis, yang akhirnya menyebabkan kerusakan fatik (*fatigue failure*). Kerusakan seperti ini telah banyak ditemukan, antara lain pada struktur jembatan Rudersdorf di Jerman yang terbuat dari pelat baja yang dilas, dan retak-retak halus pada daerah HAZ merambat saat jembatan itu menerima beban dinamis (Wiryosumarto dan Okumura, 1985).

Untuk mengurangi pengaruh buruk sambungan las seperti terjadinya retak mikro dan tegangan sisa, serta untuk meningkatkan sifat-sifat fisis dan mekanis sambungan las, maka dalam proses pengelasan perlu diperhatikan hal-hal seperti metode dan prosedur pengelasan yang benar dan tepat, serta pemilihan bahan atau logam pengisi (*filler*) yang akan dipergunakan. Di samping itu juga dapat dilakukan berbagai perlakuan sesudah pengelasan (*post-welded treatment*), seperti perlakuan permukaan (*surface treatment*), dan perlakuan panas (*heat treatment*).

Penelitian mengenai pengaruh perlakuan panas sesudah pengelasan terhadap ketahanan fatik telah banyak dilakukan. Jamasri (1997) melakukan penelitian tentang pengaruh perlakuan panas terhadap laju perambatan retak fatik baja tahan karat AISI 304. Dalam penelitian ini spesimen dikelompokkan menjadi tiga macam kondisi retak, yaitu retak tanpa pengaruh panas, retak dengan simulasi pengelasan, dan retak dengan simulasi pengelasan yang dilanjutkan

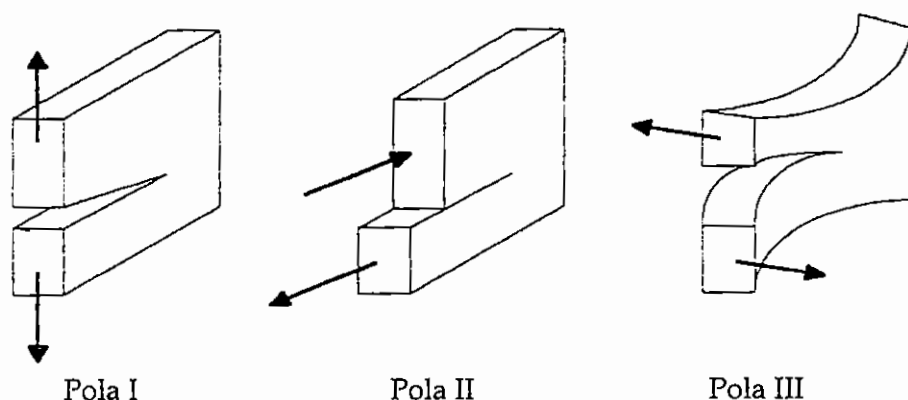
dengan perlakuan annealing. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemanasan lokal (pengelasan) pada baja tahan karat AISI 304 tidak mempengaruhi besar butir kristal austenit, tetapi dapat mempercepat perambatan retak fatik. Hal ini mungkin dapat disebabkan oleh adanya tegangan sisa selama proses pengelasan. Perlakuan panas anil dapat memperlambat perambatan retak karena butiran kristal menjadi lebih besar daripada bahan dasarnya.

Struktur mikro daerah cair (*weld metal*) dan perilaku perambatan retak fatik pada paduan Ti-6Al-4V yang dilas telah diteliti oleh Keshava Murthy, dkk (1997). Pengelasan dilakukan dengan tiga macam cara, yaitu *electron beam (EB) welding*, *gas tungsten arc welding* (GTA) manual, dan *GTA welding* otomatis. Kemudian dilakukan *post-weld heat treatment* pada suhu 900 °C dan 700 °C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daerah *weld metal* memiliki ketahanan terhadap perambatan retak fatik yang lebih tinggi daripada logam dasar, yang mungkin terjadi karena terbentuknya struktur mikro *lamellar* pada daerah cair itu.

Pengaruh pemanasan lokal terhadap ketangguhan dan laju perambatan retak plat baja "grade B" diteliti oleh Subarmono dan Jamasri (1999). Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketangguhan pada daerah HAZ lebih tinggi dibandingkan dengan logam dasar. Laju perambatan retak bergantung pada tingkat faktor intensitas tegangan (ΔK). Untuk nilai ΔK rendah, laju perambatan retak pada daerah HAZ 35% lebih rendah dibandingkan dengan logam dasar, tetapi untuk nilai ΔK tinggi, laju perambatan retak pada daerah HAZ 46% lebih rendah daripada logam dasar.

Dalam mekanika bahan dikenal tiga jenis pembebanan, seperti ditunjukkan pada gambar 1, yaitu pola I disebut pola pembukaan atau pola tarik (*opening mode*), pola II disebut pola geser dalam satu bidang (*sliding mode*), dan pola III adalah pola sobek (*tearing mode*). Rumusan tegangan dan analisis pada ujung retak untuk ketiga pola pembebanan itu adalah sama.





Gambar 1. Tiga jenis pola pembebanan

Hubungan antara karakteristik perambatan retak dengan konsep LEFM (*Linear Elastic Fracture Mechanics*) pada umumnya diberikan dalam bentuk kurva log - log (*sigmoidal*) da / dN terhadap ΔK , dengan

$$\Delta K = F \Delta \sqrt{\pi a} \dots \dots \dots (1)$$

$$= K_{maks} - K_{min}$$

Nilai F tergantung pada faktor geometri benda uji, untuk spesimen CCT (*center crack tension*).

$$F = \sqrt{\sec(\pi a/w)} \dots \dots \dots (2)$$

Apabila beban siklus dengan amplitudo konstan digunakan P_{maks} dan P_{min} , maka tegangan yang terjadi adalah S_{maks} dan S_{min} dengan kisaran tegangannya adalah :

$$\Delta \sigma = \sigma_{maks} - \sigma_{min} \dots \dots \dots (3)$$

$$K_{maks} = F \sigma_{maks} \sqrt{\pi a} \dots \dots \dots (4)$$

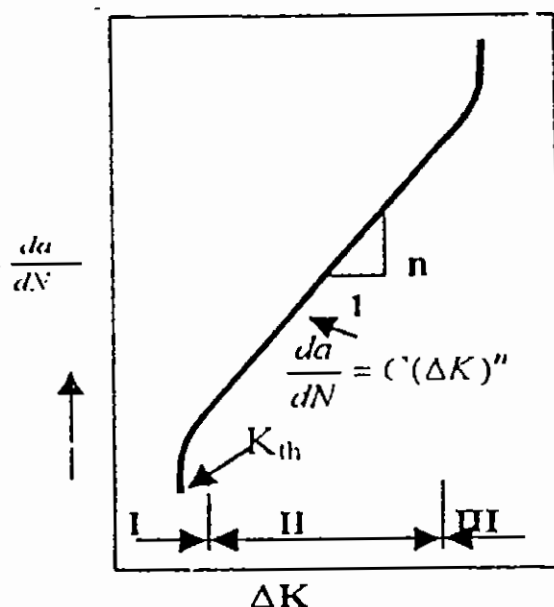
$$K_{min} = F \sigma_{min} \sqrt{\pi a} \dots \dots \dots (5)$$

$$\Delta K = K_{maks} - K_{min} \dots \dots \dots (6)$$

Rasio tegangan dapat dihitung sebagai berikut :

$$R = \frac{K_{min}}{K_{maks}} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{maks}} = \frac{P_{min}}{P_{maks}} \dots\dots\dots(7)$$

Kurva laju perambatan retak diberikan pada gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. Kurva perambatan retak fatik da/dN vs ΔK

Kurva itu berbentuk sigmoidal, terbagi menjadi tiga daerah utama, sebagai berikut .

1. Daerah I, menunjukkan suatu nilai ambang ΔK_{th} , di bawah nilai ini tidak ada perambatan retak yang dapat diamati atau diobservasi. Nilai ambang terjadi pada laju perambatan retak dalam orde $2,5 \times 10^{-10}$ (m/siklus) atau 10^{-8} (in/siklus), atau lebih rendah dari itu.
2. Daerah II, menunjukkan suatu hubungan yang linear antara $\log (da/dN)$ dan $\log (\Delta K)$ dan oleh Paris ditulis (Broek,1987) :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \dots\dots\dots(8)$$

dengan nilai n merupakan kemiringan kurva dan C adalah koefisien yang tergantung pada jenis bahan.

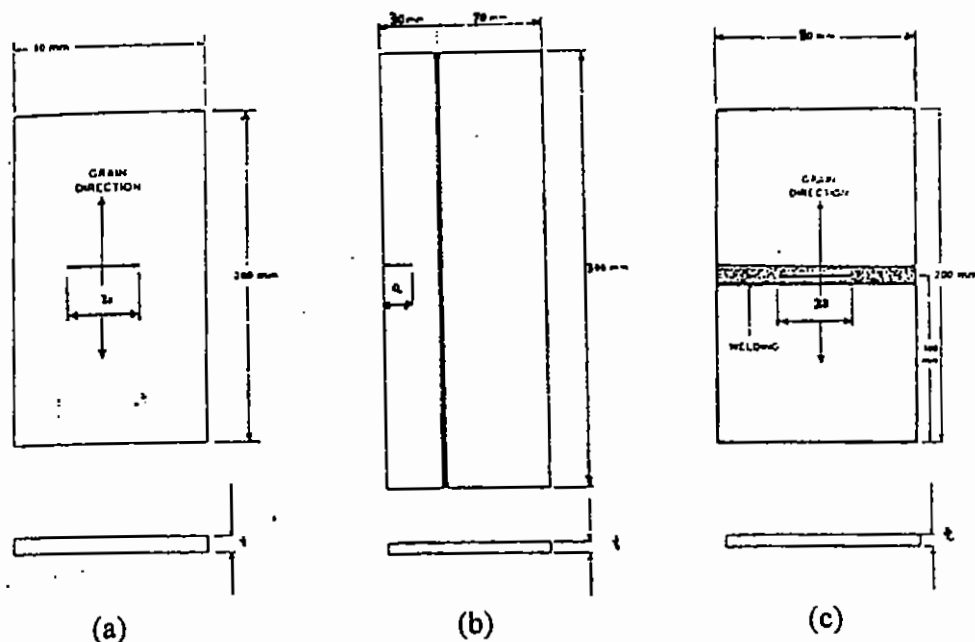
3. Daerah III, menunjukkan laju perambatan retak yang sangat tinggi sehingga sulit dikontrol. Daerah ini biasanya tidak dipertimbangkan dalam perancangan konstruksi.

CARA PENELITIAN

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah paduan Al 6013-T4 yang berbentuk pelat dengan ketebalan 2,5 mm, sedangkan filler untuk pengelasan dipakai Al 5356 dengan diameter 3,2 mm. Proses pengelasan terdiri atas sambungan tumpul membujur dan melintang. Spesimen uji perambatan retak dibuat sesuai dengan standar ASTM E-647. Retak awal untuk spesimen perambatan retak dibuat dengan mesin EDM (*Electro Discharge Machining*). Spesimen terdiri atas dua jenis retak, yaitu spesimen dengan retak awal dibagian tepi (*single edge crack specimen*) dan spesimen dengan retak awal ditengah (*center crack tension*). Menurut kondisinya, spesimen dikelompokkan menjadi tiga, yaitu bahan dasar tanpa pengelasan, bahan pengelasan tanpa perlakuan panas, dan bahan pengelasan dengan perlakuan panas T6.

Proses perlakuan panas T6 terdiri atas tiga tahap perlakuan, yaitu: (1) perlakuan pelarutan dengan memanaskan benda uji pada suhu 425 °C dan ditahan selama 2 jam, (2) *quenching*, benda uji didinginkan secara mendadak dengan mencelupkannya ke dalam media air panas (*boiling water*), dan (3) *artificial aging* pada suhu 175 °C dengan tiga macam waktu *aging*, yaitu 6 jam, 18 jam, dan 24 jam.

Uji perambatan retak fatik dilakukan dengan mesin uji servopulser Shimadzu, dengan pola pembebanan sinusoidal pada *stress level* 0,2 dan *stress ratio* (R) = 0,3. Frekuensi pembebanan diatur berkisar antara 5 dengan 15 Hz. Pertambahan panjang retak diamati dengan *traveling microscope*, dan dicatat setiap pertambahan 0,5 mm. Dari hasil pengujian itu, diperoleh data pertambahan panjang retak dan jumlah siklus yang kemudian diolah dengan metode polinomial inkremental 7-titik sesuai dengan standar ASTM E-647, sehingga dihasilkan kurva laju perambatan retak da/dN terhadap ΔK (gambar 3). Sebagai data pendukung, dilakukan juga uji tarik, kekerasan, dan struktur mikro.



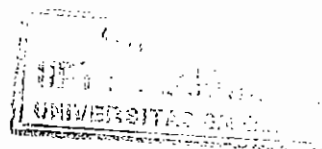
Gambar 3. Spesimen uji perambatan retak standar ASTM E-647

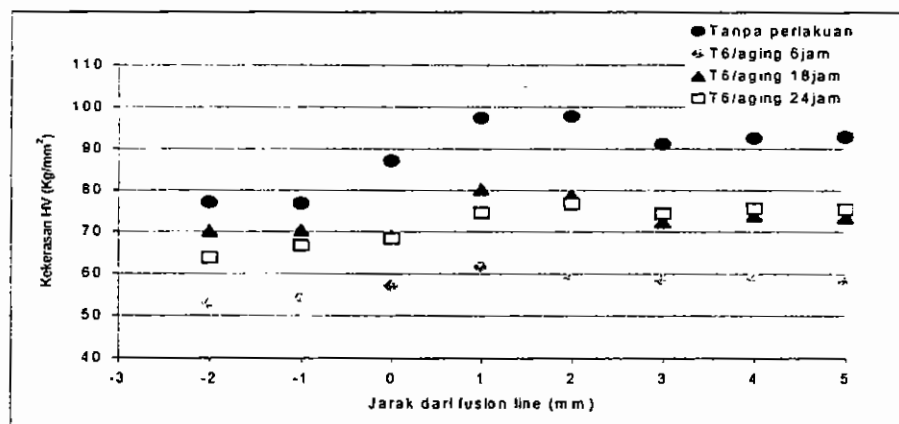
- (a) Bahan dasar (retak tengah)
- (b) Sambungan tumpul membujur
- (c) Sambungan tumpul melintang

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Kekerasan

Uji kekerasan dilakukan dengan mengacu pada fusion line (jarak 0 mm). Hasil uji kekerasan menunjukkan terjadinya penurunan kekerasan setelah dilakukan perlakuan panas T6 dengan aging pada suhu 175 °C setelah pengelasan. Penurunan ini dipengaruhi oleh pengendapan larutan fasa kedua (Mg_2Si) akibat perlakuan panas yang menyebabkan terjadinya pelunakan. Gambar 4 menunjukkan distribusi kekerasan yang serupa untuk semua jenis perlakuan, dan tampak bahwa daerah logam las (titik -1 dan -2) memiliki kekerasan yang terendah, kemudian meningkat pada daerah HAZ (titik 1 dan 2), lalu menurun kembali pada daerah logam induk. Hal ini dipengaruhi oleh komposisi *filler* Al 5356 yang tidak mengandung unsur Si yang mengakibatkan turunnya kekerasan.

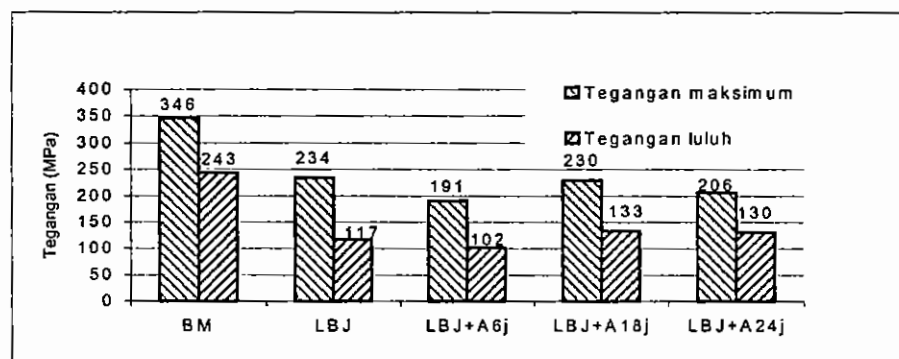




Gambar 4. Grafik hasil uji kekerasan mikro Vickers

Pengujian Tarik

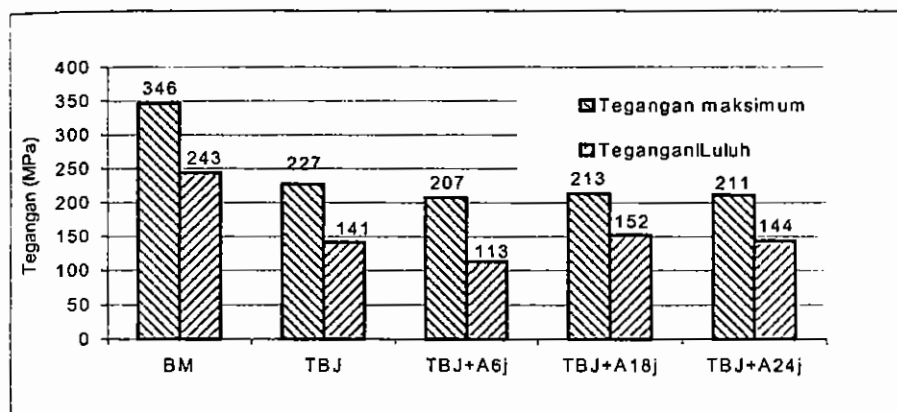
Dari hasil pengujian tampak bahwa sambungan membujur menyebabkan penurunan kekuatan tarik sebesar 32,4% dan kekuatan luluh sebesar 51,8% dibandingkan dengan bahan dasarnya. Setelah dilakukan perlakuan panas T6, kekuatan tarik juga mengalami penurunan dibandingkan dengan sebelum dilakukan perlakuan panas. Gambar 5 memperlihatkan grafik pengaruh pengelasan sambungan membujur dan perlakuan panas T6 setelah pengelasan terhadap kekuatan tarik dan kekuatan luluh paduan Al 6013.



Keterangan : BM= bahan dasar; LBJ = sambungan tumpul membujur;
A6j = aging 6 jam A18j = aging 18 jam; A24j = aging 24 jam

Gambar 5. Grafik kekuatan tarik sambungan membujur

Gambar 6 menunjukkan hasil pengujian tarik sambungan melintang. Proses pengelasan sambungan melintang menyebabkan penurunan kekuatan tarik sebesar 34,4% dan kekuatan luluh sebesar 42,0%. Setelah perlakuan panas T6, kekuatan tarik sambungan melintang juga mengalami penurunan jika dibandingkan dengan sebelum perlakuan panas, yaitu aging 6 jam sebesar 8,8%, aging 18 jam sebesar 6,2% dan aging 24 jam sebesar 7,1%.

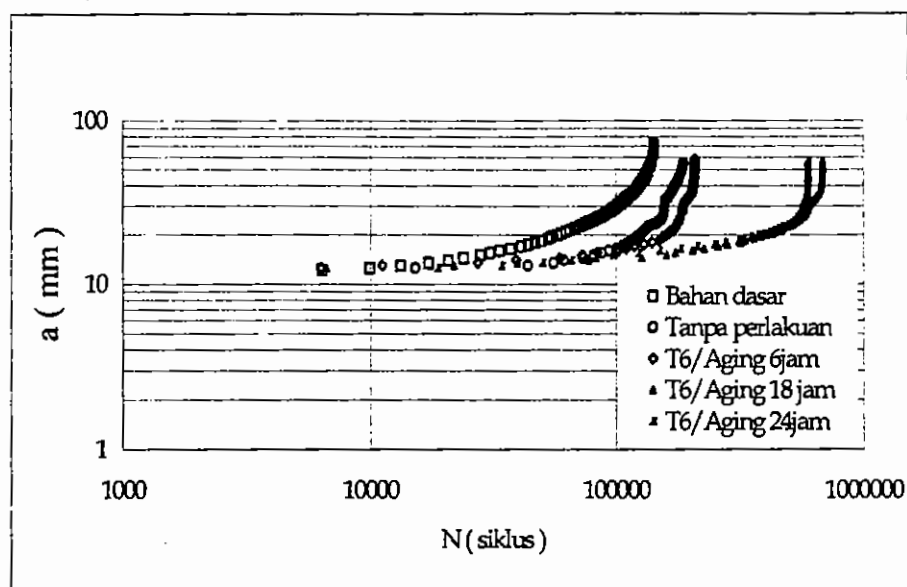


Keterangan : BM = bahan dasar; TBJ = sambungan tumpul melintang; A6j = aging 6 jam; A18j = aging 18 jam; A24j = aging 24 jam

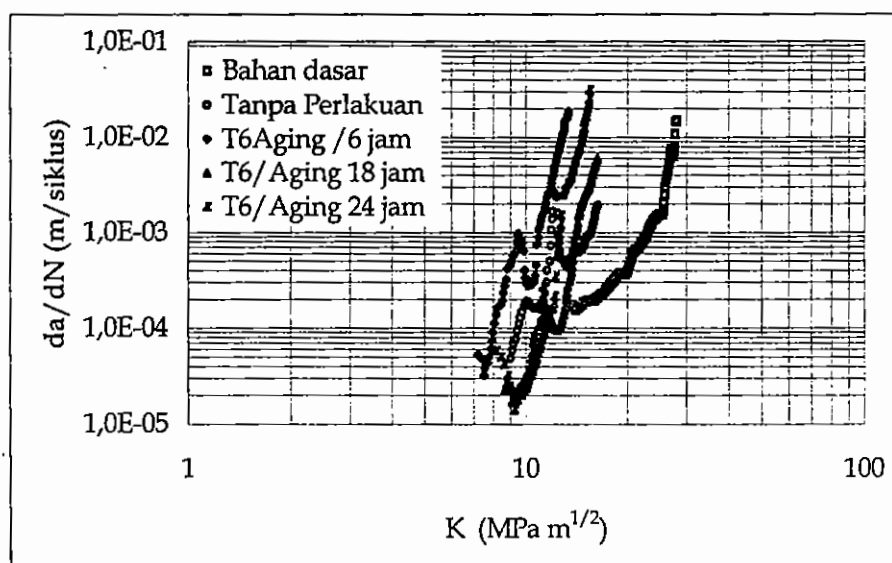
Gambar 6. Grafik kekuatan tarik sambungan melintang

Uji Perambatan Retak Fatik

Gambar 7 dan 8 menunjukkan grafik hasil pengujian perambatan retak fatik bahan dasar dan pengelasan sambungan membujur sebelum dan sesudah mengalami perlakuan panas. Hasil pengujian menunjukkan bahwa proses pengelasan sambungan membujur menyebabkan laju perambatan retak fatik meningkat, atau dengan kata lain ketahanan fatiknya berkurang, demikian juga setelah dilakukan perlakuan panas T6. Laju perambatan retak meningkat dengan cepat terutama setelah melewati daerah HAZ dan *weld metal*, karena perubahan struktur mikro terutama pada daerah HAZ, yang diakibatkan oleh siklus termal yang dialami selama proses pengelasan dan akibat perlakuan panas.



Gambar 7. Kurva a terhadap N untuk bahan dasar dan sambungan membujur



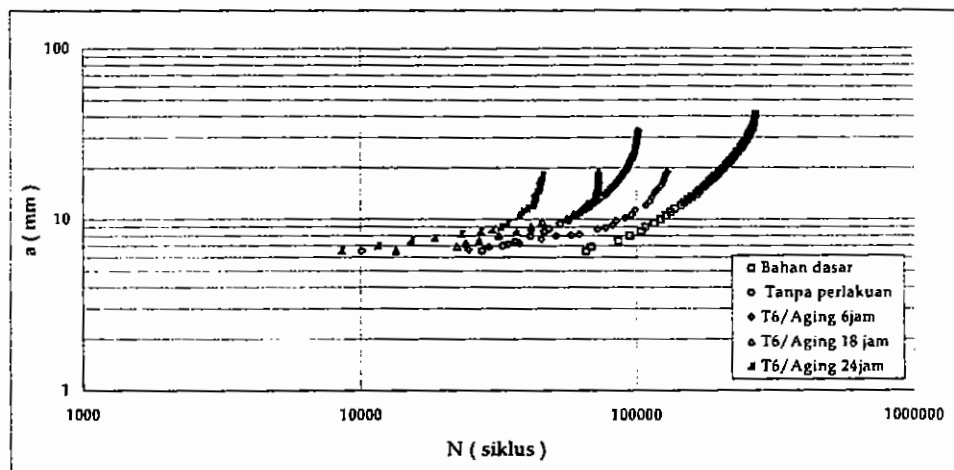
Gambar 8. Kurva da/dN terhadap ΔK untuk bahan dasar dan sambungan membujur

Dilihat dari persamaan Paris, nilai n mengalami kenaikan akibat adanya sambungan las membujur, demikian pula setelah dilakukan perlakuan panas. Hal ini menunjukkan terjadinya peningkatan laju perambatan retak fatik, dan laju tertinggi terjadi pada aging 6 jam.

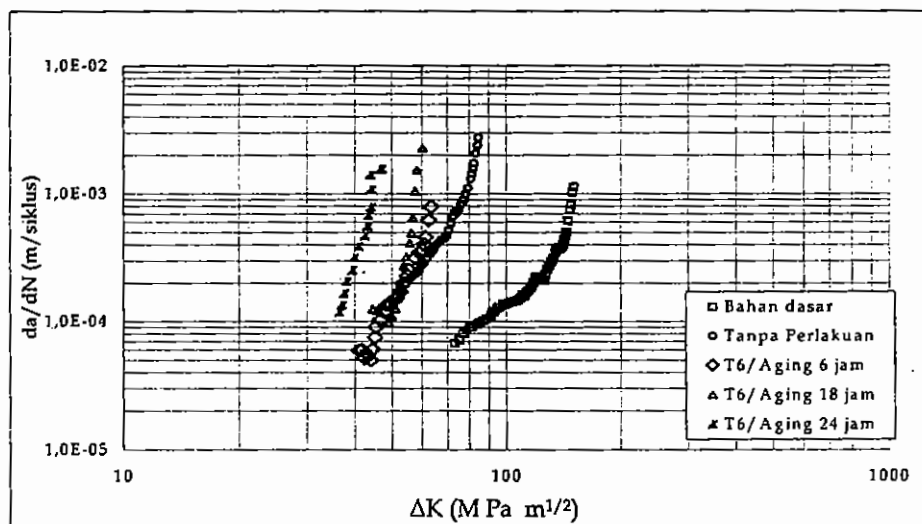
Tabel 1. Pengaruh sambungan membujur dan perlakuan panas T6 terhadap konstante Paris

| Jenis Bahan | n | C |
|--|------|-----------------------|
| Bhan dasar | 3,25 | $2,59 \times 10^{-8}$ |
| Sambungan membujur tanpa perlakuan panas T6 | 3,93 | $1,85 \times 10^{-8}$ |
| Sambungan membujur + perlakuan panas T6 / aging 6 jam | 4,79 | $1,39 \times 10^{-9}$ |
| Sambungan membujur + perlakuan panas T6 / aging 18 jam | 4,39 | $9,26 \times 10^{-9}$ |
| Sambungan membujur + Perlakuan panas T6 / aging 24 jam | 4,50 | $2,65 \times 10^{-9}$ |

Pada sambungan las melintang, retak pada logam las cenderung merambat menuju daerah HAZ, dan setelah mencapai daerah HAZ retak merambat dengan cepat hingga putus. Perlakuan panas menyebabkan ketahanan fatik semakin turun, seiring dengan bertambahnya waktu aging. Gambar 9 dan 10 menunjukkan hasil uji perambatan retak fatik sambungan melintang dan laju perambatan retak meningkat dibandingkan dengan bahan dasarnya.



Gambar 9. Kurva a terhadap N untuk bahan dasar dan sambungan melintang



Gambar 10. Kurva da/dN terhadap ΔK untuk bahan dasar dan sambungan melintang

Ditinjau dari persamaan Paris, nilai n untuk pengelasan transversal butt joint mengalami kenaikan dibandingkan dengan *base material*. Setelah perlakuan panas nilai n semakin meningkat dan nilai

terbesar adalah pada *aging* 24 jam (Tabel 2). Hal ini menunjukkan peningkatan laju perambatan retak fatik pada daerah *weld metal* akibat proses pengelasan dan perlakuan panas T6 pada *aging* 175 °C.

Tabel 2. Pengaruh pengelasan transversal dan perlakuan panas T6 terhadap konstanta Paris

| Jenis Bahan | n | C |
|--|------|------------------------|
| Bahan dasar | 3,09 | $9,43 \times 10^{-11}$ |
| Sambungan melintang tanpa perlakuan panas T6 | 3,70 | $7,34 \times 10^{-11}$ |
| Sambungan melintang + perlakuan panas T6 / <i>aging</i> 6 jam | 4,18 | $1,09 \times 10^{-11}$ |
| Sambungan melintang + perlakuan panas T6 / <i>aging</i> 18 jam | 4,36 | $5,74 \times 10^{-12}$ |
| Sambungan melintang + perlakuan panas T6 / <i>aging</i> 24 jam | 4,66 | $6,53 \times 10^{-12}$ |

Pengamatan Struktur Mikro

Dari hasil pengamatan struktur mikro, tampak bahwa terjadi perubahan struktur mikro setelah dilakukan proses pengelasan dan perlakuan panas yang mempengaruhi sifat mekanik paduan Al 6013. Setelah perlakuan panas, maka struktur menjadi lebih halus dan terjadi pelunakan akibat larutnya endapan Mg_2Si selama proses berlangsung. Hal ini menyebabkan menurunnya kekerasan, kekuatan, dan keuletan serta meningkatkan laju perambatan retak fatiknya.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dan pembahasan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut .

1. Proses pengelasan sambungan tumpul membujur atau melintang menyebabkan menurunnya kekuatan tarik dan kekuatan luluh paduan Al 6013.

2. Perlakuan panas T6 dengan *aging* 175 °C setelah pengelasan mengakibatkan menurunnya kekuatan dan kekerasan sambungan las membujur atau melintang.

3. Proses pengelasan sambungan tumpul membujur atau melintang menyebabkan peningkatan laju perambatan retak fatik bahan dasar Al 6013.

4. Perlakuan panas T6 mengakibatkan peningkatan laju perambatan retak fatik paduan Al 6013 yang dilas, baik sambungan tumpul membujur maupun melintang.

DAFTAR PUSTAKA

- ASM Handbook, volume 6, 1995, *Welding, Brazing, and Soldering*, ASM International.
- ASTM, 1995, *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Grow Rate, E647-95a*, Annual Book of ASTM Standart vol.11.03., Philadelphia.
- ASTM, 1989, *Standard Method of Tension Testing Wrought and Cast Aluminium and Magnesium-Alloy Product, B557-84*, Annual Book of ASTM Standart vol.03.01., Philadelphia.
- Broek, D., 1986, *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht.
- Cary, Howard B., 1989, *Modern Welding Technology*, Prentice Hall, New Jersey.
- Jamasri, 1997, *Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Laju Perambatan Retak Fatik Baja Tahan Karat AISI 304*, Media Teknik 19 (3), 32 - 36.
- Murthy, K., Potluri, N.B., Sundaresan, S., 1997, *Fusion Zone Microstructure and Fatigue Crack Growth Behaviour in Ti - 6Al - 4V Alloy Weldments*, Material Science and Technology, 13, 503 - 510.
- Subarmono dan Jamasri, 1999, *Pengaruh Pemanasan Lokal Terhadap Laju Perambatan Retak Plat Baja "Grade B"*, Media Teknik, XXI (1), 84 - 89.
- Wiryosumarto, H. dan Okumura, T., 1985, *Teknologi Pengelasan Logam*, PT. Pradnya Paramita, Jakarta.